

DOI: 10.12264/JFSC2022-0057

沿浦湾红树林尖锥拟蟹守螺的生境适宜性

张丽源, 水柏年, 胡成业, 王晶, 章凯, 周泽宇, 周鑫, 方学河, 李艺, 刘永钿

浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316000

摘要: 生境适宜性评价是生物资源评估及多样性保护的重要前提和基础。基于 2020 年 7 月(夏季)、10 月(秋季)及 12 月(冬季)沿浦湾红树林大型底栖动物和环境因子调查数据, 选择大型底栖动物优势种尖锥拟蟹守螺(*Cerithidea largillierti*)作为研究对象, 开展生境适宜性研究。本研究采用广义加性模型对环境因子进行初步筛选, 并利用相对权重法确定环境因子的权重, 然后分别使用加权平均法和几何平均法建立栖息地适宜性指数模型, 通过交叉检验并基于赤池信息准则(Akaike Information Iriterion, AIC)确立最优模型。结果表明, 基于几何平均法构建的栖息地适宜性指数模型最优, 选取温度、氨氮、活性磷酸盐、溶解氧、电导率、亚硝酸盐、pH 及硝酸盐为解释变量, 具有最小 AIC 值。时间生境适宜性指数表现为秋季>夏季>冬季; 空间生境适宜性指数表现为离岸段>中段>近岸段、西北部>东南部。研究发现, 沿浦湾红树林尖锥拟蟹守螺生境适宜性存在较明显的时空异质性。

关键词: 尖锥拟蟹守螺; 栖息地适宜性指数模型; 广义加性模型; 红树林生态系统; 沿浦湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2023)01–0086–10

红树林生态系统地处陆地与海洋过渡区, 是全球生产力最高的海洋生态系统之一^[1], 已成为国际生物多样性保护和湿地生态保护的重要研究对象。通过凋落物的稳定输出以及空间屏蔽作用, 红树林为大型底栖动物提供了稳定的繁殖、发育和栖息场所; 同时, 大型底栖动物作为物质循环和能量流动的重要消费者与转移者^[2], 成为红树林生态系统的重要组成部分。但大型底栖动物迁移能力有限, 生境依赖性强, 对栖息地环境变化较敏感^[3]。陈国贵等^[4]研究指出大型底栖动物时空分布与群落结构不仅可以表征其栖息地偏好, 还可直接反映红树林生态环境状况, 具有重要的生境质量指示功能。因此, 开展大型底栖动物群落特征与栖息地环境因子关系的研究, 有利于保护大型底栖动物群落稳定性及物种多样性, 并进一步建立科学有效的红树林大型底栖动物栖息地环境评估体系, 对促进红树林生态系统健康绿色发展至关重要。

栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型由美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类与野生生物署于 20 世纪 80 年代提出, 主要用于描述野生动物栖息地质量^[5], 预测和模拟生物分布, 同时评价环境变化对生物分布的影响^[6]。近些年来, 因栖息地适宜性指数模型在生物环境条件评估、时空分布预测、生物量估算评价等方面的独特优越性^[7], 研究领域逐渐从内陆河流及湖泊不断向海洋生态系统扩展, 在环境影响评价^[8]、丰度分布预测^[9]及栖息地适宜性评价^[10]等方面均有重要进展。Vincenzi 等^[6]将 GIS 技术与栖息地适宜性指数模型相结合, 开展菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)栖息地适宜性研究, 为渔业生物资源的合理利用及有效分配提供科学依据。李凤清等^[11]探究了香溪河流域四节蜉(*Baetis rhodani*)的生境适宜性, 在我国率先开展底栖动

收稿日期: 2022-06-17; 修订日期: 2022-07-08.

基金项目: 浙江省省属高校基本科研业务费项目(2021J003); 浙江省自然科学基金项目(LQ21C030006).

作者简介: 张丽源, 女(1995–), 硕士研究生, 主要从事底栖生态学. E-mail: 1229391012@qq.com

通信作者: 胡成业, 男, 讲师, 主要从事海洋重金属污染及底栖生态学研究. E-mail: zjhuchengye@zjou.edu.cn

物栖息地适宜性研究。随后, 郑文浩等^[12]、粟一帆等^[13]及王昱等^[14]分别对太子河、桥边河及黑河等内陆河流域的大型底栖动物栖息地适宜性进行评估。有关海洋生物栖息地适宜性主要围绕游泳动物展开, 如鸢乌贼(*Sthenoteuthis oualaniensis*)^[15]、皮氏叫姑鱼(*Johnius belangerii*)^[16]、鹰爪虾(*Trachypenaeus curvirostris*)^[17]、细条天竺鲷(*Apogon lineatus*)^[18]等。相较而言, 针对红树林大型底栖动物的生境适宜性研究甚少。

Wang 等^[19]研究发现, 由于人类对自然资源的不断开发利用, 尤其是海堤建设, 使得中国红树林湿地生态系统退化严重, 林区生境发生较大改变, 直接导致林内大型底栖动物群落结构及物种多样性发生变化。尖锥拟蟹守螺(*Cerithidea largillierii*)隶属于腹足纲(Gastropoda)、中腹足目(Mesogastropoda)、汇螺科(Potamididae)、拟蟹守螺属(*Cerithidea*), 贝壳呈尖锥形, 壳质结实, 为红树林生境常见大型底栖动物优势种^[20], 可作为表征红树林环境状况及其适宜性的指示物种。潮间带地处海陆交错地带, 在海陆理化因子交替作用下环境复杂多变^[21]。相关研究表明, 海洋环境中溶解氧、pH、温度、电导率、盐度及营养盐等因素的变化会直接或间接地影响尖锥拟蟹守螺这类软体动物的生长发育, 进而影响其时空分布格局^[22-25]。因此, 本研究拟选择尖锥拟蟹守螺作为

研究对象, 综合多种环境因素, 对其开展栖息地适宜性评价研究, 分析影响尖锥拟蟹守螺栖息的主要环境因子并模拟其时空分布特征, 以期为红树林生态系统修复及生物多样性保护提供基础依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

沿浦湾位于浙江省温州市苍南县南部海域, 海岸线长达 25.61 km, 总面积为 19.90 km², 其中滩涂面积占地 13.06 km², 平缓且宽阔, 属于典型的淤积型滩涂。沿浦河、下在河、岭尾河等河水径流注入, 呈现半封闭的态势, 具有滨海湿地海洋生态系统特征。2015 年沿浦湾启动红树林生态修复工程, 并取得首轮试种成功, 2017—2018 年开始大规模红树栽种, 种植面积持续增长, 截至目前沿浦湾已种植红树面积为 0.8 km²。

1.2 数据收集

1.2.1 生物样品采集 根据《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)^[26], 分别于 2020 年 7 月(夏季)、10 月(秋季)和 12 月(冬季)在沿浦湾红树林区内布设 15 个采样点(图 1)对尖锥拟蟹守螺生境适宜性进行采样调查。尖锥拟蟹守螺样本使用 30 cm×30 cm 的样方框采集, 用 0.5 mm 孔径的网筛淘洗后, 将其装入样品瓶中用无水乙醇溶液固定, 带回实验室进行分析鉴定。

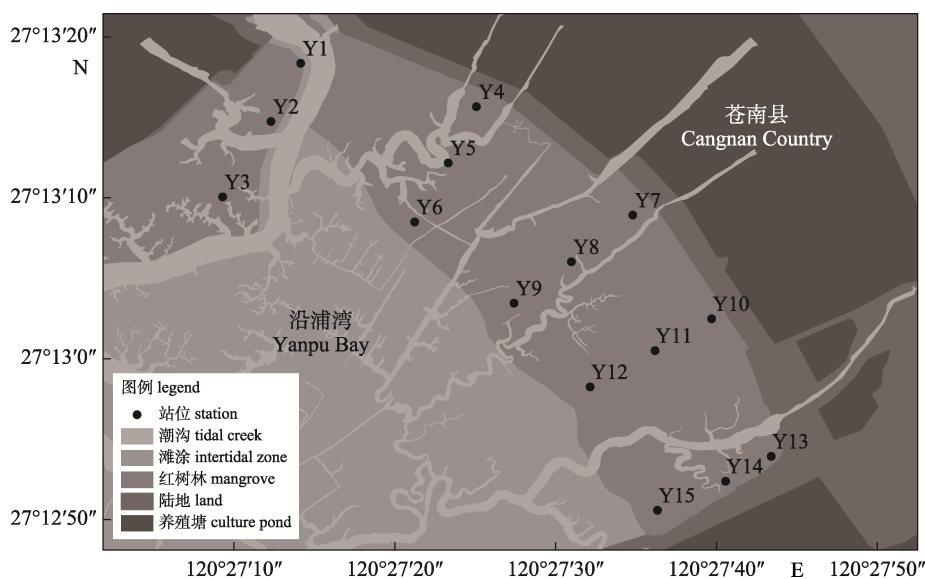


图 1 沿浦湾采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points in Yanpu Bay

1.2.2 环境因子采集 采用便携式水质检测仪 (YSI 2000) 在红树林区内现场测定各采样点水体中的溶解氧(DO)、pH、温度(Tem)、电导率(EC)、盐度(SAL), 采集 500 mL 间隙水水样置于-20 ℃ 的车载冰箱中带回实验室, 根据《海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析》(GB 17378.4-2007)^[27], 在实验室内测定水样的氨氮(NH₃-N)、亚硝酸盐(NO₂-N)、硝酸盐(NO₃-N)及活性磷酸盐(PO₄-P)等水体生境指标。

1.3 数据处理

1.3.1 栖息地指示因子 在筛选环境变量前, 为避免各变量之间存在多重共线性从而导致模型过度拟合, 首先对变量进行相关性分析, 剔除相关系数≥0.8 的环境变量^[28-29]。本研究选取溶解氧、pH、温度、电导率、盐度、氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐及活性磷酸盐等 9 个环境因子作为解释变量, 采用尖锥拟蟹守螺的丰度作为响应变量建立 GAM 模型, 分析物种丰度与环境因子之间的关系。

$$\ln(Y+1)=\alpha+\sum_{i=1}^nf_i(x_i)+\varepsilon$$

式中, Y 为丰度, 为应对丰度为 0 值的情况, 本研究采用丰度加 1, 再进行对数化处理的方法; α 为截距项; n 为解释变量的个数; $f_i(x_i)$ 为解释变量样条的平滑函数; ε 为误差项。为避免过度拟合, 所有的平滑被限制在 4 节^[30]。赤池信息准则 (Akaike Information Iriterion, AIC) 检验可明确添加不同环境因子后模型的拟合程度, AIC 越小, 模型的拟合效果越好^[31]。

1.3.2 栖息地适宜性指数模型 HSI 模型的不同计算方法对其预测结果的影响不同, 因此分别采用加权平均法 (Weighted Average Model, WAM) 和几何平均法 (Geometric Mean Model, GMM) 计算栖息地适宜度指数 HSI, 对比两种算法的性能, 选取预测效果更优的算法进行 HSI 模型的运算。

$$HSI_{WAM}=\sum_{i=1}^nw_i\times SI_i$$
$$HSI_{GMM}=\left(\prod_{i=1}^nSI_i^{w_i}\right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^nw_i}}$$

式中, HSI 为栖息地适宜性指数, w_i 为第 i 个栖息地指

示因子的权重, 采用相对权重 (relative weight) 法确定; SI_i 为第 i 个栖息地指示因子的适宜度^[32]。

1.3.3 模型检验 采用交叉验证法评估 HSI 模型的预测性能。随机选取 80% 的调查数据建立模型, 将剩余 20% 的数据代入模型进行交叉验证, 该过程重复进行 100 次, 评估 HSI 模型的预测准确性^[33]。同时, 采用 GAM 模型中的 AIC 值评估基于 WAM 和 GMM 算法的 HSI 模型综合预测性能, 从而选取最优模型, 利用克里金插值绘制 HSI 时空分布图。相关性分析使用 SPSS 25 软件完成, GAM 模型及平滑回归模型构建使用 R×64 4.0.4 软件完成, 克里金插值使用 ArcGIS 10.7 软件完成。

2 结果与分析

2.1 栖息地指示因子选取

沿浦湾红树林各环境因子的统计结果如表 1 所示。本研究以尖锥拟蟹守螺的丰度为因变量, 不同环境因子组合为自变量, 分别将各环境因子组成不同的组不断添加至 GAM 模型中, 观察不同环境变量组合形式下 AIC 值的变化情况, 以具有较低 AIC 值的自变量组合作为解释变量。温度、氨氮、电导率、硝酸盐、亚硝酸盐、活性磷酸盐、溶解氧及 pH 的组合 AIC 值最低 (图 2), 因此本研究使用上述环境因子的组合构建 HSI 模型。

利用相对权重法, 分析各环境因子的权重值 (图 3), 其中温度的权重值最大, 为 35.6%, 氨氮、

表 1 沿浦湾红树林各采样点环境因子值
Tab. 1 Values of environmental factors at each sampling point of mangrove in Yanpu Bay

编号 serial number	环境因子 environmental factors	$\bar{x}\pm SD$
1	温度 Tem/℃	20.63±7.67
2	氨氮 NH ₃ -N/(mg/L)	0.05±0.04
3	电导率 EC/(μS/cm)	32816.64±8428.23
4	硝酸盐 NO ₃ -N/(mg/L)	0.64±0.59
5	亚硝酸盐 NO ₂ -N/(mg/L)	0.03±0.07
6	活性磷酸盐 PO ₄ -P/(mg/L)	0.04±0.02
7	DO/(mg/L)	1.62±2.36
8	pH	7.30±0.49
9	盐度 SAL	22.52±6.97

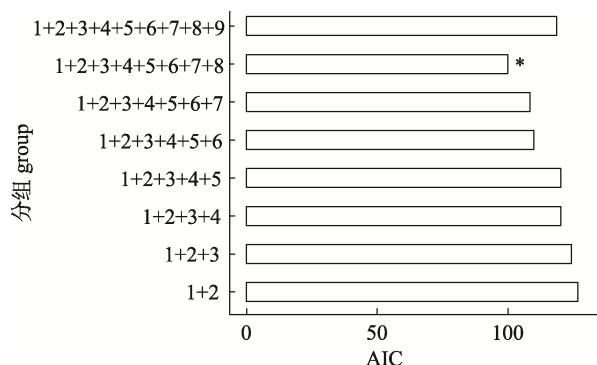


图 2 所有环境因子逐级拟合后 AIC 最小组合的 GAM 模型检验

1. 温度, $^{\circ}\text{C}$; 2. 氨氮, mg/L ; 3. 电导率, $\mu\text{S/cm}$;
4. 硝酸盐, mg/L ; 5. 亚硝酸盐, mg/L ; 6. 活性磷酸盐, mg/L ;
7. 溶解氧, mg/L ; 8. pH; 9. 盐度。

本研究中的 GAM 模型是对所有环境因子的所有组合形式的拟合, 但因组合过多, 图中仅展示相同环境因子数量下 AIC 最小的组别, 并将其进行比较。

Fig. 2 GAM model test of the combination with the minimum AIC value after step by step fitting of all environmental factors
1. temperature, $^{\circ}\text{C}$; 2. ammonia nitrogen, mg/L ; 3. electrical conductivity, $\mu\text{S/cm}$; 4. nitrate, mg/L ; 5. nitrite, mg/L ; 6. reactive phosphate, mg/L ; 7. dissolved oxygen, mg/L ; 8. pH; 9. salinity.
The GAM model in this study is a fitting of all combination forms of all environmental factors. However, due to too many combinations, this figure only shows the group with the lowest AIC in the same number of environmental factors and compares them.

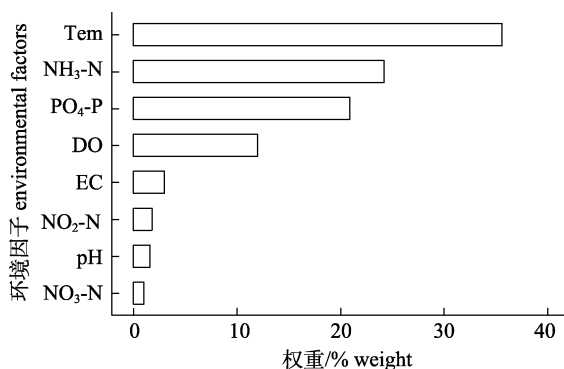


图 3 不同环境因子的相对权重

Tem: 温度, $^{\circ}\text{C}$; NH₃-N: 氨氮, mg/L ; PO₄-P: 活性磷酸盐, mg/L ; DO: 溶解氧, mg/L ; EC: 电导率, $\mu\text{S/cm}$; NO₂-N: 亚硝酸盐, mg/L ; NO₃-N: 硝酸盐, mg/L 。

Fig. 3 Relative weights of different environmental factors
Tem: temperature, $^{\circ}\text{C}$; NH₃-N: ammonia nitrogen, mg/L ;
PO₄-P: reactive phosphate, mg/L ; DO: dissolved oxygen, mg/L ;
EC: electrical conductivity, $\mu\text{S/cm}$; NO₂-N: nitrite, mg/L ;
NO₃-N: nitrate, mg/L .

活性磷酸盐、溶解氧、电导率、亚硝酸盐、pH 及硝酸盐等环境因子的权重依次为 24.2%、20.9%、

12.0%、3.0%、1.8%、1.6%及 1.0%。

2.2 栖息地适宜度曲线

根据适宜度曲线分析可知(图 4), 尖锥拟蟹守螺最适宜水温范围为 $14\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最适氨氮浓度范围为 $0\sim 0.01\text{ mg/L}$, 最适活性磷酸盐浓度范围为 $0.08\sim 0.10\text{ mg/L}$, 最适溶解氧的浓度范围为 $6\sim 10\text{ mg/L}$, 最适电导率范围为 $38000\sim 46000\text{ }\mu\text{S/cm}$, 最适亚硝酸盐浓度范围为 $0.062\sim 0.12\text{ mg/L}$, 最适 pH 范围为 $6.6\sim 8.0$, 最适硝酸盐浓度范围为 $0.22\sim 0.53\text{ mg/L}$ 。

2.3 栖息地适宜度指数

采用交叉检验的方法评估 WAM 模型与 GMM 模型的预测性能发现(表 2), 运用 GMM 算法构建的 HSI 模型的 AIC 值均较低, 故选取 GMM 算法研究尖锥拟蟹守螺的栖息地适宜性。

将各站指示环境的单因子适宜度代入 HSI 模型, 分析各采样站位的栖息地适宜性指数发现, 适宜性指数呈现离岸段(Y3, Y6, Y9, Y12, Y15) > 中段(Y2, Y5, Y8, Y11, Y14) > 近岸段(Y1, Y4, Y7, Y10, Y13), 西北部 > 东南部(图 5)。此外, 不同季节间的栖息地适宜性差异较显著(图 6), 其中秋季栖息地适宜性显著高于夏季及冬季($P < 0.05$), 夏季显著高于冬季($P < 0.05$), 夏季栖息地适宜性指数范围为 $0.22\sim 0.60$; 秋季栖息地适宜性指数范围为 $0.43\sim 0.68$; 冬季栖息地适宜性指数范围为 $0.14\sim 0.43$ 。

3 讨论

3.1 模型评价

不同环境因子对指示物种的影响不同, 因此进行 HSI 模型分析时应赋予各因子适当的权重并确定其最优组合。然而, 以往的研究由于缺少环境对物种分布影响程度的信息, 仅根据专家经验对环境因子的贡献赋值, 缺少基本数据支持^[34-35]。然而, 环境因子对生物分布的影响是复杂多变的过程, 常受地理位置、气候条件、物种发育程度等的制约。因此, 筛选最优的环境因子组合, 并将其纳入 HSI 模型构建中是非常必要的。故本研究利用 GAM 模型筛选环境因子, 结合相对权重法量化各环境因子的权重, 进而确定最优环境组合以提高模型的预测性能。栗一帆等^[13]研究发现, 在

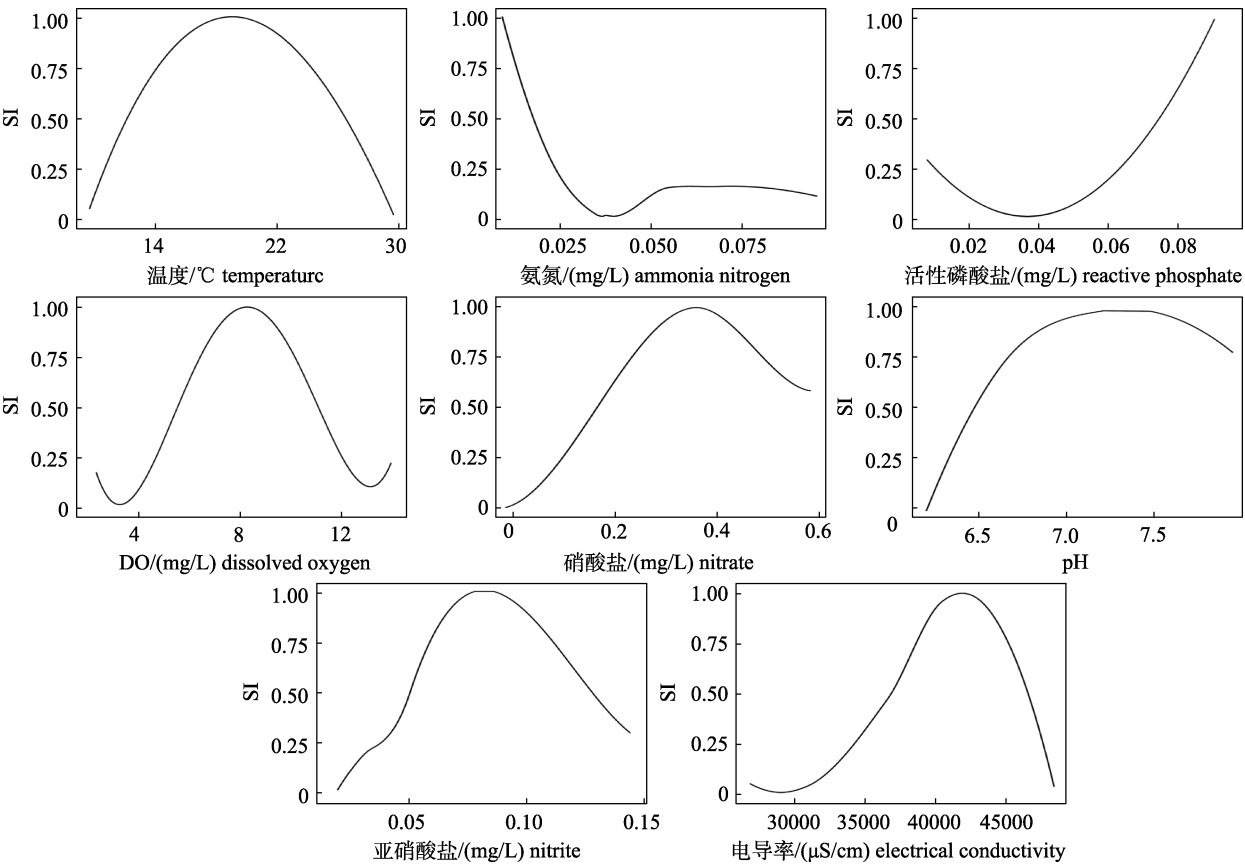


图 4 各环境因子单因子适宜度曲线
Fig. 4 Suitability curve of single factor for each environmental factor

表 2 WAM 和 GMM 模型预测性能比较
Tab. 2 Comparison of predictive performance between WAM and GMM

季节 season	WAM		GMM	
	AIC	P	AIC	P
夏季 summer	55.19045	0.041	26.26975	0.000
秋季 autumn	48.14644	0.042	43.53538	0.050
冬季 winter	20.76577	0.027	8.972714	0.000

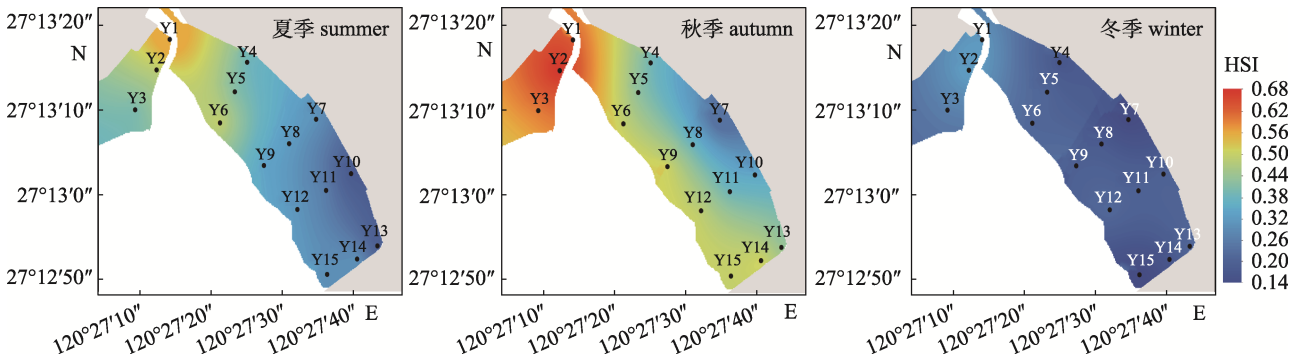


图 5 夏季、秋季及冬季尖锥拟蟹守螺 HSI 分布
Fig. 5 Distribution of HSI of *Cerithidea largillierti* in summer, autumn and winter

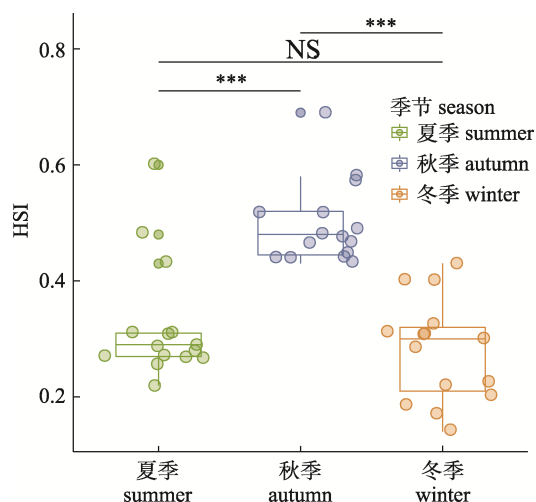


图 6 夏季、秋季及冬季尖锥拟蟹守螺 HSI 显著性检验
Fig. 6 HSI significance test of *Cerithidea largillierti* in summer, autumn and winter

非线性拟合时, GAM 模型能有效规避过拟合现象, 精确、合理地模拟生境因子与生物选择之间的关系。故本研究采用 GAM 模型作为建立 HSI 模型的辅助手段, 能较好地反映沿浦湾红树林尖锥拟蟹守螺的栖息地适宜性。

3.2 影响尖锥拟蟹守螺生境适宜性的环境因素

不同环境因子对尖锥拟蟹守螺丰度的影响存在差异, 其中影响其生境适宜性的关键环境因子主要为温度、氨氮、活性磷酸盐及溶解氧。

温度直接影响水生生物的体温, 决定了生物代谢的强弱, 影响生物的生长、发育、繁殖^[36]。李宝泉等^[23]发现, 水温升高, 底栖软体动物生长繁育加快, 生产力提高, 栖息地适宜性呈现上升趋势。然而, 孟宪亮^[37]研究发现, 当温度过高时, 潮间带螺类的生长发育便会受到抑制, 这也使得尖锥拟蟹守螺可能生长缓慢或者完全停止生长, 导致栖息地适宜性呈现下降趋势。王昱等^[14]采用栖息地适宜性指数模型对黑河中上游大型底栖动物栖息地适宜度进行研究也发现, 水温是制约生境适宜度的主要因素。

氨氮、活性磷酸盐等含氮营养盐的含量在一定程度上影响大型底栖动物的分布^[38]。在适宜营养盐范围内尖锥拟蟹守螺丰度较高, 生长繁衍迅速; 但随着其浓度的持续升高尖锥拟蟹守螺的生境适宜性指数逐渐降低。这可能是水体中营养盐

含量高, 可有效提高初级生产力, 为尖锥拟蟹守螺提供丰富的饵料来源; 然而, Siuda 等^[39]研究发现, 当营养盐含量过高时, 水体中过多的饵料将被微生物分解, 消耗溶解氧, 致使水体和底质中硫化物的含量升高^[40], 进而限制尖锥拟蟹守螺的分布。

溶解氧是软体动物赖以生存的关键环境因子, 其含量对群落结构特征具有显著性的影响^[41-42]。Chen 等^[43]研究表明, 软体动物溶解氧的最低临界值为 6 mg/L, 过低的溶解氧会限制其活动能力。本研究发现, 尖锥拟蟹守螺的适宜溶解氧范围为 6~10 mg/L, 在适宜范围内, 间隙水中溶解氧含量升高, 尖锥拟蟹守螺的生理、行为及繁殖等方面的活动频繁, 栖息地适宜度也随之提高; 当其浓度超过适宜范围后, 随着浓度的升高尖锥拟蟹守螺的栖息地适宜度也会随之降低。究其原因, 可能是在溶解氧浓度较高的环境中, 沉积物中的有机碎屑分解加快^[22,44], 导致尖锥拟蟹守螺的食物来源减少, 制约尖锥拟蟹守螺的生存, 故其栖息地适宜度下降。

3.3 栖息地适宜度指数的时空分布特征

沿浦湾红树林尖锥拟蟹守螺生境适宜性存在较明显的时空异质性, 主要表现为西北高东南低, 并呈离岸越近栖息地适宜性指数越低的趋势。这可能与红树林抵御风浪、减缓潮流有关。聂梓超^[45]研究表明, 当潮流进入红树林区后, 流速逐渐减小, 波高逐渐衰减, 林区内呈现一个几乎只有水位升降的环境变化, 这导致近岸段沉积作用较强, 秋茄的根、茎上常有淤泥沉积, 附着尖锥拟蟹守螺较少。同时, 近岸段常受居民赶海、采捕等人类活动的影响, 生境遭到破坏^[46], 故其生境适宜性较低。离岸段处于向海边缘, 水流较为通畅, 能有效去除排泄物, 为尖锥拟蟹守螺提供饵料及氧气, 促进生物的附着及生长, 故红树林离岸段的生境适宜性较高。另外, 调查区域西北部红树林区含有一潮沟, 该潮沟较为宽阔, 因缺少红树林防风消浪作用, 相较于东南部区域受潮波影响较大, 涨落潮时海流较为湍急, 并裹挟着丰富的营养物质, 为尖锥拟蟹守螺创造了适宜的栖息环境, 故红树林西北部的生境适宜性较高。周时强等^[47]

在福建九龙江口红树林的研究中也发现,附着生物主要分布在水流通畅的向海边缘及潮沟边缘。

温度足以改变局部地区的生境层级,是导致栖息地适宜性指数呈季节性差异的主要原因^[48-49]。HSI 模型分析结果表明,夏季、秋季及冬季均以次适宜生境为主,夏季及秋季部分采样点为适宜生境。随着季节变化适宜生境、次适宜生境及不适宜生境会相互转化。这可能是季节更替引起的温度变化直接影响了尖锥拟蟹守螺的生长发育。同时,尖锥拟蟹守螺作为植食者,秋茄凋落物是其潜在的饵料来源。潘浩^[50]指出,秋茄凋落物及落叶能量存在明显的季节波动,10 月秋茄凋落物总量达到峰值,这也在一定程度上影响了尖锥拟蟹守螺的季节分布,进而导致栖息地适宜性指数呈现秋季较高的特征。

3.4 沿浦湾红树林生态栖息地保护

张苗苗等^[51]研究发现,沿浦湾红树林种植后,尖锥拟蟹守螺由窄生态位种变为广生态位种,对资源的利用能力增强,说明沿浦湾秋茄的种植对尖锥拟蟹守螺这类植食性生物的生存繁衍具有积极意义。但本研究发现,如今沿浦湾红树林尖锥拟蟹守螺栖息地适宜性指数总体偏低,这可能是沿浦湾于 2015 年进行红树林修复,成林时间较短,其生态系统的稳定性较为脆弱,易受人类活动干扰的影响。另外,俞松立^[52]和张苗苗等^[51]发现,沿浦湾红树林沉积物重金属中的铜含量超过国家沉积物一类标准,且成为影响大型底栖动物分布的主要因素之一。该区域重金属的来源可能是位于沿浦湾西部约 10 km 的福建沙垵港工业园区,该区域排放的工业废水随着海流进入沿浦湾并沉积。根据实地走访调查,研究区域附近围塘养殖业发达,大量养殖污水排放至沿浦湾,加之赶海采捕等人为干扰严重,使得尖锥拟蟹守螺的适宜栖息生境丧失或碎片化。故沿浦湾红树林总体生境适宜性指数偏低,受干扰后恢复能力较差,栖息地生态环境质量状况不容乐观。综上,推进养殖模式转型升级,加强生态保护知识宣传,减少人为干扰及威胁,是切实发挥红树林强大的生态功能,保障沿浦湾生态资源健康可持续发展的重要举措。

参考文献:

- [1] Huang Y Q. Study on the biodiversity of macrobenthic fauna in the wetland of the *Luoyangjiang mangrove* nature reserve[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography (TIO) of the Ministry of Natural Resources, 2010. [黄雅琴. 洛阳江红树林自然保护区大型底栖动物多样性研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2010.]
- [2] Xu Z D, Shi H H, Li N C, et al. Macrobenthic community structure and its relationship with environmental factors in the southern waters of the Miaodao archipelago[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(5): 704-712. [徐兆东, 石洪华, 李乃成, 等. 庙岛群岛南部海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(5): 704-712.]
- [3] Pelletier M C, Gold A J, Heltshe J F, et al. A method to identify estuarine macroinvertebrate pollution indicator species in the Virginian Biogeographic Province[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(5): 1037-1048.
- [4] Chen G G, Wang W Q, Gu X, et al. Effects of mangrove community turnover on different macrobenthic assemblages in Zhangjiang Estuary, Fujian[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4310-4317. [陈国贵, 王文卿, 谷宣, 等. 漳江口红树植物群落周转对大型底栖动物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4310-4317.]
- [5] U. S. Fish and Wildlife Service. Standards for the development of suitability index models[R]. Washington D C: U. S. Fish and Wildlife Service, 1981.
- [6] Vincenzi S, Caramori G, Rossi R, et al. A GIS-based habitat suitability model for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a Mediterranean coastal lagoon (Sacca di Goro, Italy)[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 193(1-2): 90-104.
- [7] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(2): 260-269. [龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(2): 260-269.]
- [8] Rüger N, Schlüter M, Matthies M. A fuzzy habitat suitability index for *Populus euphratica* in the Northern Amudarya delta (Uzbekistan)[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 184(2-4): 313-328.
- [9] Brambilla M, Casale F, Bergero V, et al. GIS-models work well, but are not enough: Habitat preferences of *Lanius collurio* at multiple levels and conservation implications[J]. *Biological Conservation*, 2009, 142(10): 2033-2042.
- [10] Imam E, Kushwaha S P S, Singh A. Evaluation of suitable tiger habitat in Chandoli National Park, India, using spatial modelling of environmental variables[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(24): 3621-3629.

- [11] Li F Q, Cai Q H, Fu X C, et al. Construction of habitat suitability models for macrobenthos and study on environmental flow in stream: a case study of Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(12): 1417-1424. [李凤清, 蔡庆华, 傅小城, 等. 溪流大型底栖动物栖息地适合度模型的构建与河道内环境流量研究: 以三峡库区香溪河为例[J]. 自然科学进展, 2008, 18(12): 1417-1424.]
- [12] Zheng W H, Qu X D, Zhang Y, et al. Habitat suitability of macroinvertebrates in the Taizi river basin, northeast China[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(12): 1355-1363. [郑文浩, 渠晓东, 张远, 等. 太子河流域大型底栖动物栖息地适宜性[J]. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1355-1363.]
- [13] Su Y F, Li W M, Li J J, et al. Habitat suitability of macroinvertebrates: A case study in Qiaobian River, a tributary of Yangtze River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5844-5854. [粟一帆, 李卫明, 李金京, 等. 桥边河大型底栖动物生境适宜性[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5844-5854.]
- [14] Wang Y, Zuo Y F, Feng Q, et al. Assessment of macrozoobenthos habitat suitability in the upper and middle reaches of the Heihe River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1116-1127. [王昱, 左一锋, 冯起, 等. 黑河中上游大型底栖动物栖息地适宜度评估[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1116-1127.]
- [15] Fan J T, Zhang J, Feng X, et al. Fishery forecast research of purpleback flying squid in Nansha area based on Habitat model[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(5): 20-26. [范江涛, 张俊, 冯雪, 等. 基于栖息地模型的南沙海域鳶乌贼渔情预报研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(5): 20-26.]
- [16] Zhang Y L, Xue Y, Yu H M, et al. Study on the habitat suitability of *Johnius belangerii* during spring in the Haizhou Bay, China[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(6): 83-91. [张云雷, 薛莹, 于华明, 等. 海州湾春季皮氏叫姑鱼栖息地适宜性研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 83-91.]
- [17] Chen Y X, Zhang Y L, Huang N Y, et al. Study on the habitat suitability of *Trachypenaeus curvirostris* in the Haizhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(4): 84-95. [陈艺璇, 张云雷, 黄铭妍, 等. 海州湾鹰爪虾栖息地适宜性研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(4): 84-95.]
- [18] Tang L, Zhang Y L, Xu B D, et al. Habitat suitability analysis of *Apogon lineatus* during autumn in Haizhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(S1): 154-160. [唐龙, 张云雷, 徐宾铎, 等. 海州湾秋季细条天竺鲷栖息地适宜性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(S1): 154-160.]
- [19] Wang W Q, Fu H F, Lee S, et al. Can strict protection stop the decline of mangrove ecosystems in China? from rapid destruction to rampant degradation[J]. Forests, 2020, 11(1): 55.
- [20] Hu C Y. Ecological study on macrobenthos community in Shazhou wetland of Ounan estuary[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2016. [胡成业. 甬江南口沙洲湿地大型底栖动物群落生态学研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2016.]
- [21] Zhou S Q, Guo F, Wu L S, et al. The study on the ecology of the benthic community in intertidal zone, Fujian Islands[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(5): 104-109. [周时强, 郭丰, 吴荔生, 等. 福建海岛潮间带底栖生物群落生态的研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 104-109.]
- [22] Lu Z H, Zhu W B, Xu K D, et al. Community structure of snails and its relationship with environmental factors along Zhejiang coast in spring[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(3): 606-615. [卢占晖, 朱文斌, 徐开达, 等. 浙江沿岸海域春季螺类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 2018, 42(3): 606-615.]
- [23] Li B Q, Li X Z, Yu H Y, et al. Macrobenthic Mollusca fauna and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(3): 193-198. [李宝泉, 李新正, 于海燕, 等. 胶州湾底栖软体动物与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(3): 193-198.]
- [24] Ye J Q, Cai L Z, Huang R J, et al. Species composition of trawling mollusk in Beibu Gulf and its environmental effect[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(6): 617-622. [叶洁琼, 蔡立哲, 黄睿婧, 等. 北部湾底拖网软体动物的种类组成及其环境影响[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 617-622.]
- [25] Ma W H. The feeding ecology of snails on benthic algae[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [马文华. 螺类对附着藻类的摄食生态研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [26] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China., Standardization Administration. Specification for oceanographic survey: GB/T 12763-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化委员会. 海洋调查规范: GB/T 12763-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [27] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China., The specification for marine monitoring—Part 4: Seawater analysis: GB 17378.4—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化委员会. 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析: GB 17378.4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [28] Li G L, Wang W J, Li B X, et al. Potential geographic distribution of *Costaria costata* in China based on the MaxEnt

- Model and ArcGIS[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(12): 1588-1601. [李国梁, 汪文俊, 李宝贤, 等. 基于 MaxEnt 模型和 ArcGIS 预测多肋藻在中国海域的适生分布特征[J]. 中国水产科学, 2021, 28(12): 1588-1601.]
- [29] Ye X Z, Zhang M Z, Lai W F, et al. Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8135-8144. [叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 等. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8135-8144.]
- [30] Niu M X, Li X S, Xu Y C. Effects of spatiotemporal and environmental factors on the fishing ground of *Trachurus murphyi* in Southeast Pacific Ocean based on generalized additive model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 1049-1055. [牛明香, 李显森, 徐玉成. 基于广义可加模型的时空和环境因子对东南太平洋智利竹筴鱼渔场的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 1049-1055.]
- [31] Guthery F S, Burnham K P, Anderson D R. Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach[J]. The Journal of Wildlife Management, 2003, 67(3): 655.
- [32] Chang Y J, Sun C L, Chen Y, et al. Habitat suitability analysis and identification of potential fishing grounds for swordfish, *Xiphias gladius*, in the South Atlantic Ocean[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(23): 7523-7541.
- [33] Tanaka K, Chen Y. Spatiotemporal variability of suitable habitat for American lobster (*Homarus americanus*) in long island sound[J]. Journal of Shellfish Research, 2015, 34(2): 531-543.
- [34] Liu W, Xin M L, Zhou J, et al. Habitat hierarchies distribution of *Sargassum muticum* in Lidao Bay, Shandong, China based on habitat suitability index model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1061-1068. [刘玮, 辛美丽, 周健, 等. 基于生境适宜性指数模型的俚岛海葵子生境层级分布[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1061-1068.]
- [35] Yang G, Zhang T, Zhuang P, et al. Preliminary assessment of habitat of juvenile *Collichthys lucidus* in the Yangtze Estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2418-2424. [杨刚, 张涛, 庄平, 等. 长江口棘头梅童鱼幼鱼栖息地的初步评估[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2418-2424.]
- [36] Chen C X, Zhang J B, Wang X M, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(3): 299-313. [陈传曦, 张建柏, 王新萌, 等. 渤海莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2021, 28(3): 299-313.]
- [37] Meng X L. Physiological responses to temperature and salinity stress in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* and intertidal marine snails (chlorostomas and *Littorina*)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [孟宪亮. 刺参和潮间带螺类对温度和盐度胁迫的生理响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [38] Wang H J, Yao W M, Lin Y, et al. Macrobenthic community and its relationship with environmental factors in the Yueqing Bay, Zhejiang Province, China[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(2): 75-86. [王航俊, 姚炜民, 林义, 等. 乐清湾大型底栖动物群落及其与环境因子之间的关系[J]. 海洋学报, 2020, 42(2): 75-86.]
- [39] Siuda W, Grabowska K, Kaliński T, et al. Trophic state, eutrophication, and the threats for water quality of the great mazurian lake system[M]. Polish River Basins and Lakes - Part I. Cham: Springer International Publishing, 2019: 231-260.
- [40] de Jonge M, Dreesen F, de Paepe J, et al. Do acid volatile sulfides (AVS) influence the accumulation of sediment-bound metals to benthic invertebrates under natural field conditions? [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(12): 4510-4516.
- [41] Wang H R, Chen Y C, Liu Z W, et al. Correlation analysis of macroinvertebrate community and habitat factors in the middle reaches of Mudan River[J]. China Environmental Science, 2015, 35(4): 1197-1204. [王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟, 等. 牡丹江中游底栖动物分布及其与栖境因子的关系[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 1197-1204.]
- [42] Jia H B, Hu H Y, Tang J L, et al. Ecology of macrobenthos in the south of Zhejiang coastal waters[J]. Journal of oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(4): 577-582. [贾海波, 胡颖琰, 唐静亮, 等. 浙江南部近岸海域大型底栖生物生态[J]. 台湾海峡, 2011, 30(4): 577-582.]
- [43] Chen L Y, Heath A, Neves R. Comparison of oxygen consumption in freshwater mussels (Unionidae) from different habitats during declining dissolved oxygen concentration[J]. Hydrobiologia, 2001, 450(1): 209-214.
- [44] Kitagawa N. A classification of Japanese Lakes based on hypolimnetic oxygen and benthonic fauna[J]. Japanese Journal of Limnology (Rikusuigaku Zasshi), 1978, 39(1): 1-8.
- [45] Nie Z C. Numerical study of wave characteristics in typical mangroves bays of Guangdong Province[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. [聂梓超. 广东典型红树林海湾波浪特性数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.]
- [46] Tian J Q, Wang Y X, Tian K, et al. Study on the characteristics of the macrobenthic community in the intertidal zone along the Yanpu Bay before and after *Kandelia candel* planting[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural

- Science), 2018, 37(2): 114-122. [田嘉琦, 王咏雪, 田阔, 等. 秋茄种植前后沿浦湾潮间带大型底栖动物群落特征变化研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 114-122.]
- [47] Zhou S Q, Li F X, Hong R F. Ecological studies on mangrove fouling animals in Jiulong River Estuary, Fujian[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1993, 12(4): 335-341. [周时强, 李复雪, 洪荣发. 九龙江口红树林上附着动物的生态[J]. 台湾海峡, 1993, 12(4): 335-341.]
- [48] Zhou J, Song J J, Bai Q L, et al. Habitat suitability of *Scapharca subcrenata* (Lischke) in the shallow water of the Xiaoheshan Island[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(12): 51-57.
- [49] Zhou J, Wang Q X, Zhao W X, et al. Habitat suitability analysis of eelgrass *Zostera marina* L[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(1): 69-78.
- [50] Pan H. Mangrove litterfall dynamics and the relationships with climatic factors[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019. [潘浩. 红树林凋落物动态及其与气候因子之间的相关关系[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.]
- [51] Zhang M M, Wang Y X, Tian K, et al. Changes in the ecological niche and functional groups of macrozoobenthos before and after the planting of *Kandelia candel* in Yanpu Bay, Zhejiang[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(5): 949-958. [张苗苗, 王咏雪, 田阔, 等. 沿浦湾秋茄种植前后大型底栖动物生态位和功能群变化[J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 949-958.]
- [52] Yu S L. The study on macrobenthos community, *Kandelia candel* growth, sediment quality and their relationship in Yanpu Bay[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020. [俞松立. 沿浦湾大型底栖动物群落、秋茄生长和沉积物质量及其关系研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.]

Habitat suitability of *Cerithidea largillierti* in the mangroves of Yanpu Bay

ZHANG Liyuan, SHUI Bonian, HU Chengye, WANG Jing, ZHANG Kai, ZHOU Zeyu, ZHOU Xin, FANG Xuehe, LI Yi, LIU Yongtian

College of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China

Abstract: Habitat suitability assessment is an important prerequisite and basis for assessing biological resources and protecting biodiversity. Based on the survey data of macrobenthos and environmental factors in the summer, autumn, and winter of 2020 in the mangrove of Yanpu Bay, we have studied the habitat suitability of macrobenthos. In this study, *Cerithidea largillierti*, the dominant species of macrobenthos, was selected as the research object. A Generalized Additive Model was used to screen environmental factors, and the relative weight method was used to determine the weight of environmental factors. Then, the habitat suitability model was established by using the Weighted Average Model and Geometric Mean Model, respectively, and the optimal model was established based on cross check and Akaike Information Criterion (AIC). The results showed that the Habitat Suitability Index model based on Geometric Mean Model was the best fit model, and temperature, ammonia nitrogen, reactive phosphate, dissolved oxygen, electrical conductivity, nitrite, pH, and nitrate with the minimum AIC value were selected as explanatory variables. The temporal Habitat Suitability Index showed that autumn > summer > winter. The spatial Habitat Suitability Index showed that offshore section > middle section > nearshore section, northwest section > southeast section. The results showed that there was obvious spatial and temporal heterogeneity in the habitat suitability of *C. largillierti* in the mangroves of Yanpu Bay. The findings may be used to raise awareness among researchers and policymakers. In addition, more comprehensive and scientific surveys will help to better understand the habitat suitability of macrobenthos in the future.

Key words: *Cerithidea largillierti*; habitat suitability index model; generalized additive model; mangrove ecosystem; Yanpu Bay

Corresponding author: HU Chengye. E-mail: zjhuchengye@zjou.edu.cn